

해군 함정 격실 유류화재 대응을 위한 수성막포 분사 최적화에 대한 CFD 해석 연구

전길송 · 김휘성 · 심재웅 · 유용호 · 박진욱[†]

한국건설기술연구원 화재안전연구소
(2024년 4월 23일 접수, 2024년 5월 29일 수정, 2024년 5월 29일 채택)

CFD Analysis Study on Aqueous Film Forming Foam Injection Optimization to Respond to Oil Fires in Naval Ship Compartment

Kil-Song Jeon, Hwi-Seong Kim, Jae-Ung Sim, Yong-Ho Yoo and Jin-Ouk Park[†]

Department of Fire Researcher Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea
(Received April 23, 2024; Revised May 29, 2024; Accepted May 29, 2024)

초 록

해군 함정에서 화재가 발생하면 잠재적인 인적, 물적 손실을 완화하기 위해 신속한 진압과 통제가 필수적이다. 해군 함정의 특성상 유류화재 발생 가능성이 크며 이에 유류화재 대응에 탁월한 수성막포(AFFF)를 사용하는 것이 화재 진압에 매우 중요하다. 또한 함정의 격실 내에서 화재가 발생하는 상황 역시 고려해야 한다. 이러한 상황에서 수성막포의 궤적과 적용 범위를 이해하는 것이 중요하므로 격실 환경에 맞는 소화 시스템 설계가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 수성막포에 대한 전산유체역학 (CFD) 방법론을 검증하기 위한 해석으로 분사 높이 및 각도에 대한 적용 가능성을 조사하였다. 이러한 내용을 바탕으로 하여 함정 격실에 적용가능한 CFD 해석 결과를 얻었다. 이 결과는 해군 함정 격실 내 유류 화재에 신속하게 대응할 수 있는 소화 시스템 개발의 기반이 될 것이다.

Abstract

When a fire occurs on a naval vessel, rapid suppression and control are essential to mitigate potential human and material losses. Due to the nature of naval vessels, the risk of fuel fires is significant, making the use of aqueous film-forming foam (AFFF) crucial for effective fire suppression. Additionally, the possibility of fires occurring within compartments on the vessel must also be considered. Understanding the trajectory and application range of AFFF in such environments is vital, necessitating the design of firefighting systems tailored to compartmental conditions. In this study, an analysis was conducted to investigate the feasibility of applying spray height and angle for AFFF using computational fluid dynamics (CFD) methodology as a validation tool. Based on these findings, CFD analysis results applicable to compartment environments on naval vessels were obtained. These results will serve as the foundation for the development of firefighting systems capable of promptly responding to fuel fires within naval vessel compartments.

Keywords: Aqueous film forming foam (AFFF), Oil fire, Naval ship compartment, Computational fluid dynamics (CFD), Optimization

1. 서 론

해군 함정은 해양 방어의 보루로서 전 세계 국가의 회복력과 전략적 능력을 구현한다. 그러나 이들 선박은 강력한 성능에도 불구하고 지속적인 위협인 화재에 직면해 있다. 복잡한 기계 시스템과 다량의 연료 비축량과 결합된 해군 함정의 밀폐된 환경은 화재 발생의 피해

에 특히 취약하게 만든다[1-3].

해군 작전의 전략적 중요성과 선박의 인원과 자산을 모두 보호해야 한다는 필요성을 인식한 본 연구에서는 해군 환경이 제기하는 고유한 과제에 맞게 특별히 맞춤형된 화재 안전 조치를 강화하는 데 초점을 맞췄다[4-6]. 육상 기반 구조물과 달리 해군 함정은 역동적이고 종종 적대적인 해상 조건에서 작동하므로 화재 진압 및 제어에 대한 전문적인 접근 방식이 필요하다[7].

수성막포(AFFF, aqueous film forming foam)는 해군 화재 진압 기술의 핵심 구성 요소로 작용한다. 유류화재 진압에 탁월한 효능을 지닌 AFFF는 기존 소방 방법에 큰 어려움을 초래하는 해군 화재 사고의 주요 이슈를 해결한다[8,9]. AFFF의 폼 생성을 통한 질식 소화 특성은

[†] Corresponding Author: Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Fire Researcher Institute, Hwaseng 18544, Korea
Tel: +82-31-369-0525 e-mail: jopark@kict.re.kr

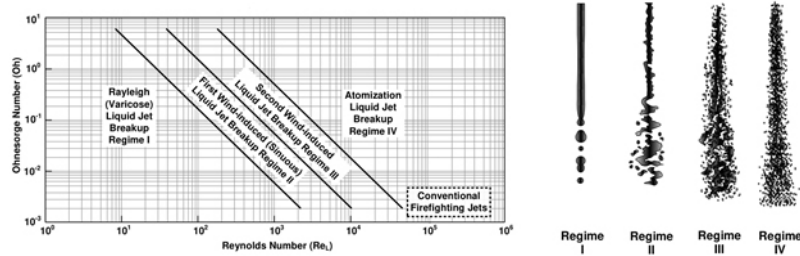


Figure 1. Classification of droplet breakup.

이러한 사고에 대응하는 데 매우 적합하며, 해군 함정에서 잠재적인 인명 피해와 물질적 손실을 완화하는 데 중요한 신속하고 효과적인 진압 기능을 제공한다[10-12]. 특히 AFFF는 액체 가연물 위에서의 빠른 이동, 유동성, 자체 복원력, 탁월한 화재 진화 능력을 제공한다. 이는 AFFF가 불소와 탄화수소 계면활성제의 혼합으로 이루어졌으며, 이러한 계면활성제의 혼합은 AFFF의 효과적인 성능을 확보하는 데 핵심적인 역할을 하기 때문이다.

더욱이, 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics)은 해군 용 소화 시스템의 설계 및 최적화에서 귀중한 도구로 부각되고 있다 [13-15]. 선박 구획의 제한된 공간 내에서 실제 실험을 수행해야 하는 제약을 고려할 때 신뢰성이 높은 CFD 해석 결과는 필수적이다 [16-18]. CFD 시뮬레이션을 활용하여 설계자는 광범위한 시나리오와 분사 매개변수를 탐색하여 해군 환경의 특정 요구 사항과 제약 조건에 맞게 맞춤 설계된 화재 진압 시스템을 개발할 수 있다[19-21].

이러한 고려 사항을 고려하여 본 연구에서는 특히 해군용으로 맞춤화된 첨단 화재 진압 시스템을 개발하기 위해 다각적으로 접근하였다 [22,23]. 주요 맥락으로 해군 함정에 초점을 맞추으로써 연구는 해양 환경에 내재된 고유한 과제와 제약을 해결하여 해군 작전에서 화재 안전 프로토콜의 탄력성과 효율성을 향상시키고자 하였다. 이론적 모델링과 실제 실험을 모두 포괄하는 분석을 통하여 화재 사고로 인한 즉각적인 위험을 완화할 뿐만 아니라 해군 함정이 글로벌 무대에서 대표하는 전략적 이익과 작전 능력을 보호하는 것을 추구한다[24,25].

2. 수치해석과 CFD

2.1. 수치해석 방법

수성막포의 분사 궤적 및 분사 거리 예측을 위한 유동 해석은 상용 CFD 코드인 ANSYS FLUENT 2022 R2를 사용하였다. 본 해석은 연속상(대기)과 분산상(수성막포) 두 개의 상이 존재하고, 두 개의 상의 상호작용을 모사하기 위해 연속상은 Eulerian, 분산상은 Lagrangian 관점에서 식 (1), 식 (2)를 계산하여 입자의 궤적을 추적하는 particle tracking 모델인 DPM (discrete phase model)을 이용하였다.

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\tau_r} + \vec{F} \quad (1)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu C_d Re} \quad (2)$$

여기서, m_p 는 입자의 무게이며 u_p 는 입자의 속도이다. u 는 유체의 속도이고 τ_r 은 입자에 작용하는 항력, g 는 중력 가속도, ρ_p 는 입자의 밀도, ρ 는 유체의 밀도이다. F 는 힘(additional force)이고 d_p 는 입자의

지름, μ 는 유체의 점성이고 C_d 는 입자의 항력 계수, Re 는 레이놀즈 수이다.

액적 형태에 따른 항력 계수 적용을 위해 dynamic drag 모델을 사용하였으며, dynamic drag 모델은 식 (3), 식 (4)와 같이 구부터 디스크 형태까지의 액적 형태를 기반으로 항력 계수를 계산하게 된다.

$$C_{d,disk} = C_{d,sphere} (1 + 2.632y) \quad (3)$$

$$C_{d,sphere} = \begin{cases} 0.424 & Re > 1000 \\ \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{\frac{2}{3}} \right) & Re \leq 1000 \end{cases} \quad (4)$$

여기서, y 는 액적의 왜곡(droplet distortion)이다.

일반적으로 수성막포 분사는 높은 압력과 속도하에서 이루어져 Liquid Core가 존재하지 않는 형태의 액적 분열이 지배적이다(Figure 1). 이와 같은 현상을 모사하기 위해 액적의 충돌(collision)과 합체(coalescence), 액적 분열(break-up) 모델을 적용하였다. 액적 분열 모델은 식 (5)를 통해 계산된 Weber 수에 의해 결정되었으며, 본 해석에서의 분사 조건에 따른 Weber 수는 100 이상으로 KHRT (Kelvin-Helmholtz Rayleigh-taylor) break-up 모델을 적용하였다(식 (6)). 충돌은 O'Rourke (1981)의 이론 기반의 식 (7), 식 (8)을 통해 동일한 연속상 격자에 있는 입자 간의 충돌 확률을 추정하며, 추정된 확률을 토대로 충돌 후 입자의 합체(coalescence)나 튕김(bouncing)을 결정하게 된다.

$$We = \frac{\rho u^2 r}{\sigma} \quad (5)$$

여기서, r 은 입자의 반지름이다.

$$r_c = \frac{\pi C_{RT}}{\sqrt{\frac{-g_i(\rho_p - \rho)}{3\sigma}}} \quad (6)$$

여기서, r_c 는 분열 후 액적의 반지름이며 C_{RT} 는 분열 상수, g_i 는 액적 가속도, V 는 표면장력이다.

$$P_1 = \frac{\pi(r_1 + r_2)^2 U_r \Delta t}{V} \quad (7)$$

여기서, P_1 은 충돌 확률이며 r_1, r_2 는 입자의 최대 및 최소 직경이다. U_r 은 입자 간 상대속도이며 V 는 연속상 격자의 체적이다.

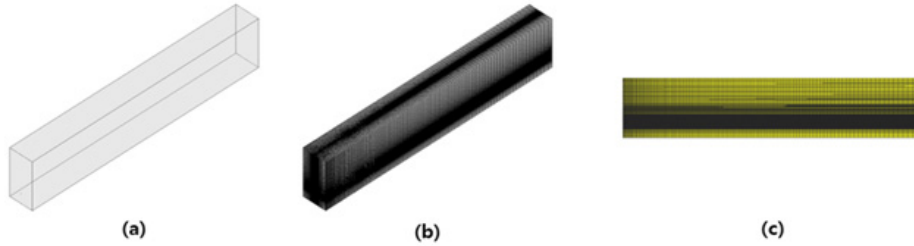


Figure 2. Analysis geometry and grids (a : Full analysis area, b : Analysis geometry grid, c : Analysis geometry section grid).

$$\bar{n} = \frac{n_2 \pi (r_1 + r_2)^2 U_r \Delta t}{V} \quad (8)$$

여기서, \bar{n} 는 충돌 예상 수이며 n_2 는 최소 액적 parcel의 액적 수이다. 본 해석 조건에서 Reynolds 수는 2.9×10^5 로 난류로 가정하였으며, 난류 모델은 realizable k-epsilon 모델을 적용하였다. 난류 방정식을 포함하여 해석에 적용된 지배방정식은 식 (9)~식 (11)과 같다.

[Conservation of mass]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (9)$$

[Conservation of momentum]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \rho + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (10)$$

[Realizable k-epsilon model]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (11)$$

여기서, $\vec{\tau}$ 는 응력 텐서이며 수식 $u [(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I)]$ 로 나타낼 수 있다. \vec{F} 는 외부 물체력이며 k 는 난류 운동에너지, ϵ 은 소산율, μ_t 는 난류 점성, σ_k 는 난류 Prandtl 수이다. G_k 는 속도 구배로 생성된 난류 운동 에너지이며 G_b 는 부력에 의해 생성된 난류 운동 에너지, Y_M 은 전체 소산율에 대한 압축성 난류 팽창 기여도이며 S_m, S_k 는 소스항이다.

2.2. 해석 형상 및 경계 조건

본 연구는 기존 실외 공간에서 수행한 수성막포 분사 실험데이터를 활용하여 현재 설계한 해석 내용이 적합한지에 대한 검증 해석을 먼저 수행하였다. 또한 해당 내용을 기반으로 하여 실제 적용하고자 하는 함정 격실 내부에서의 수성막포 분사 특성을 확인하기 위한 해석으로 나누어서 수행하였다.

2.2.1. 검증 해석

Figure 2는 검증 해석에 이용된 해석 형상 및 격자를, Table 1은 검증 해석 조건을 나타낸 것이다. 해석 영역은 폭 5 m, 높이 10 m, 길이 50 m이며, 격자 수준이 해석 결과에 미치는 영향을 확인하기 위해 3 수준(coarse, medium, fine)의 격자를 이용하여 해석을 수행하였다. 이는 CFD 해석에서 주로 사용되는 격자 의존도 테스트를 위한 해석 수행이며, 일반적으로 사용되는 3 수준(coarse, medium, fine) 해석 격자를

Table 1. Analysis Conditions (Analysis Verification)

Analysis conditions	Coarse	Medium	Fine
Number of grids (Hexahedron Grid)	About 1700000	About 2800000	About 4800000
Analysis area [m]	Wide (5), High (10), Length (50)		
Injection pressure [bar]	2.9		
Spray nozzle diameter [m]	0.065		
Spray angle [°]	30		
Spray nozzle height [m]	2		
Working fluid	Water-liquid (AFFF 6% physical properties applied)		
	Density : 1020 kg/m ³		
	Viscosity : 8E-06 m ² /s		
	Surface tension : 0.072 N/m		

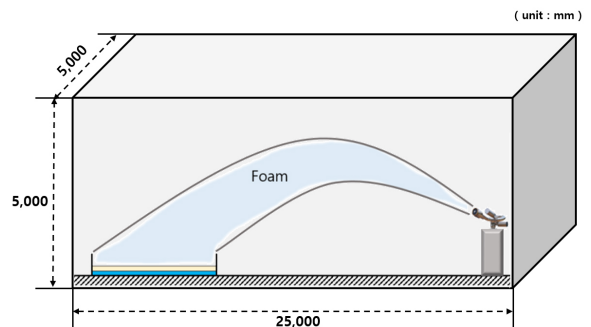


Figure 3. Naval ship compartment spraying system schematic diagram.

이용하였다. 분사구가 위치한 면을 제외한 모든 면은 출구 조건을 적용하였으며, 분사된 수성막포의 입자가 해석 영역의 경계면과 충돌하는 경우 입자는 해석 영역을 빠져나가는 것으로 가정하였다. 해석 결과에서 분사 도달거리의 분사 방향으로부터 가장 멀리 위치한 입자까지의 거리로 정의하였으며, 실험 결과와 해석 결과의 분사 도달거리 비교를 통해 해석 방법의 타당성을 검증하였다.

2.2.2. 함정 격실 해석

Figure 3은 수성막포 격실 분사 시스템 개략도를, Figure 4는 해석 영역 및 격자를 나타낸 것이다. 실내 분사 사전 해석 영역은 폭 5 m, 높이 5 m, 길이 25 m이며, 해석 격자는 약 80만 개로 격자 수준에 따른 검증 해석 결과에 의해 결정되었다. 해당 격실의 사이즈는 실제 함정 내에 보편적으로 탑재된 격실의 실제 사이즈를 반영한 것이다. 사전 해석은 transient 해석으로, 총 해석 시간은 분사 시작 후 2 초로 하

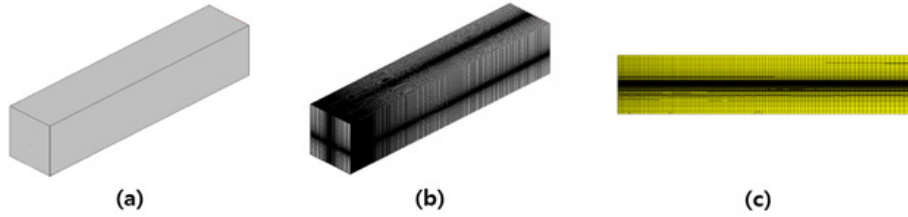


Figure 4. Analysis geometry and grids for compartment (a : Full analysis area, b : Analysis geometry grid, c : Analysis geometry section grid).

Table 2. Analysis Conditions (Naval Ship Compartment)

Number of grids (Hexahedron grid)	About 800000
Analysis area [m]	Wide (5), High (5), Length (25)
Injection pressure [bar]	6.5
Spray nozzle diameter [m]	0.04
Spray angle [°]	5 / 10 / 15
Spray nozzle height [m]	1 / 1.5 / 2 / 2.5
Working fluid	Water-liquid (AFFF 6% physical properties applied)
	Density : 1020 kg/m ³
	Viscosity : 8E-06 m ² /s
	Surface tension : 0.072 N/m
	Droplet diameter : 0.01 m

여 해석을 수행하였다. Table 2는 실내 분사 사전 해석 조건을 나타낸 것이다. 총 해석 Case는 분사 각도와 분사노즐 높이에 따라 12가지이며, 모든 Case의 분사압과 분사노즐의 직경은 각각 6.5 bar, 0.04 m로 동일하다. 해당 조건 역시 실제 함정에서 사용되고 있는 조건을 그대로 차용하였다. 분사구가 위치한 면에 출구 조건을 적용하였으며, 이외의 면은 벽 경계조건을 적용하였다. 분사구를 제외한 모든 면은 분사되는 수성막포 입자와 충돌하게 되면 입자는 반사되어 해석 영역으로 돌아온다고 가정하여 해석을 수행하였다.

2.3. 해석 검증을 위한 실험

앞에서 설계한 해석 내용의 검증을 위하여 수성막포에 대한 분사 실험을 직접 수행하였으며, 이 결과와의 비교를 통하여 적합성을 확인하고자 하였다. 현재 실제 해군 함정 격실에 대한 실험을 수행할 수 없으므로 대체하여 개활지에서 수성막포 분사 실험 결과를 활용하였다. 실험에 사용된 수성막포는 비중 1.03 (at 20 °C), 확산계수 4.5의 특성을 가지며, 직경 25 mm의 플렉시블 호스를 통해 폼 혼합장치로 약제가 인입된다. 실험은 분사 모니터 분사각 30°, 분사압 0~3.9 bar 범위로 선형적으로 증가시켜 AFFF의 분사거리를 측정하였으며, 분사압은 분사모니터 직 후단에 설치된 압력계를 통하여 측정되었고 펌프 스테이션의 출력을 조정하여 조절하였다. 거리 측정은 10 m 단위로 거리 측정 이정표를 배치한 후 영상 분석을 통해 도달 거리를 분석하였다. 펌프스테이션을 이용하여 가압을 시작한 후 15 초가 경과되면 분사압이 0.4 bar 가 되고 도달거리는 10 m에 이른다. 21 초까지 분사압을 2.0 bar 맞추고 약 8 초 정도를 유지시키다가 29 초가 되는 시점부터 폼 혼합장치 밸브를 열어 폼을 주입하였으며 주입 직후 도달 거리는 18 m로 측정되고 있다. 38초부터 다시 가압되어 2.0 bar에 20 m,

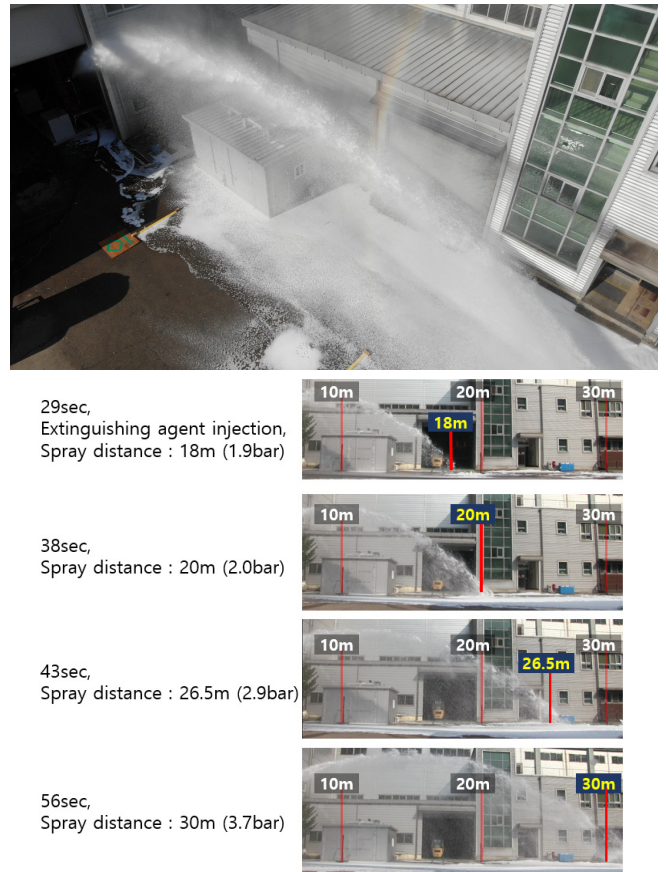


Figure 5. AFFF spray distance measurement experiment.

43 초에 26.5 m (2.9 bar), 56 초에 최대분사거리인 30 m (3.7 bar)까지 도달하고 있다. 폼 분사 측정 결과를 Figure 5에 나타내었다[26].

3. 결과 및 고찰

앞에서 설명했듯이 본 연구의 해석은 2단계로 나누어서 진행하였다. 해석 적용을 위해 설정한 조건들의 타당성을 검증 해석을 통하여 확인하고자 하였으며, 실제 적용시키고자 한 함정 격실에서의 분사 해석을 이어서 수행하였다. 해당 결과는 다음과 같다.

3.1. 검증 해석 결과

Table 3은 분사압 2.9 bar, 분사 각도 30° 기준 격자 수준에 따른 실험 및 검증 해석 결과를 비교한 것이다. 해당 분사 조건에서 실험 결과 분사 도달거리는 26.5 m, 검증 해석 결과 분사 도달거리는 Coarse

Table 3. Comparison of Experimental and Analysis Results According to Grid Level

	Experiment result	Coarse	Medium	Fine
Injection pressure [bar]		2.9		
Spray angle [°]		30		
Spray reach [m]	26.5	26.7	26.7	26.9
Error factor [%]	-	0.7% (up)	0.7% (up)	1.3% (up)

격자 26.7 m, Medium 격자 26.7 m, Fine 격자 26.9 m로 나타났다. 실험 결과와 검증 해석 결과의 오차율은 0.7%~1.3%로 분사 도달거리 예측에 있어 격자 수준이 미치는 영향은 크지 않다고 판단하였으며, Coarse 수준의 격자를 이용하여 추후 해석을 수행하였다.

Table 4와 Figure 6은 분사 각도 30° 기준 분사압에 따른 실험 및 검증 해석 결과를 비교한 것으로, 실험 결과와 해석 결과의 오차율은 0.7~12.2%로 나타났다. 이는 분사 도달거리를 분사방향으로부터 가장 멀리 위치한 입자까지의 거리로 정의함으로써 발생한 오차와 CFD 해석 특성상 실험에 비해 외부 요소에 의한 영향이 적게 적용되고, 해석 수행 시 분사압에 따라 분사되는 액적의 크기가 균일하다고 가정하면서 발생한 오차에 의한 것으로 판단된다.

3.2. 함정 격실 적용 결과

Figure 7, 8은 각각 최종 계산시간에서 수성막포 입자의 속도 분포 및 분사 도달거리와 수성막포 입자의 직경 및 분사 도달거리를 나타낸 것이며, Figure 9와 Tables 5-7은 해석 시간에 따른 분사 각도 및 분사 모니터 높이별 분사 최대 높이와 분사 도달거리를 나타낸 것이다. 분사 모니터 높이와 분사 각도가 증가함에 따라 분사 도달거리 및

Table 4. Comparison of Experimental and Analysis Results According to Injection Pressure

	2 bar	2.9 bar	3.7 bar
Experiment result [m]	20	26.5	30
Analysis results [m]	22.8	26.7	29.5
Error factor [%]	12.2% (up)	0.7% (up)	1.6% (down)

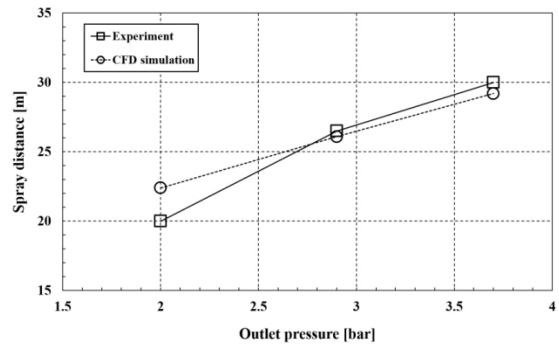


Figure 6. Comparison of experimental results and verification analysis results according to injection pressure.

최대 분사 높이는 증가하는 경향을 보였으며, 분사 모니터 높이 대비 분사 각도가 분사 도달거리 및 최대 분사 높이에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 분사 모니터 높이 2.5 m, 분사 각도 15°의 경우 최대 분사 높이가 실내 해석 영역 높이인 5 m를 초과하는 것으로 나타났으며, 분사된 수성막포가 천장과 충돌하게 되면서 충돌로 인한 속도 감소 및 운동 에너지 손실 등에 의해 분사 각도가 동일한 다른 해석 Case 대비 최종 분사 도달거리가 가장 짧게 나타났다.

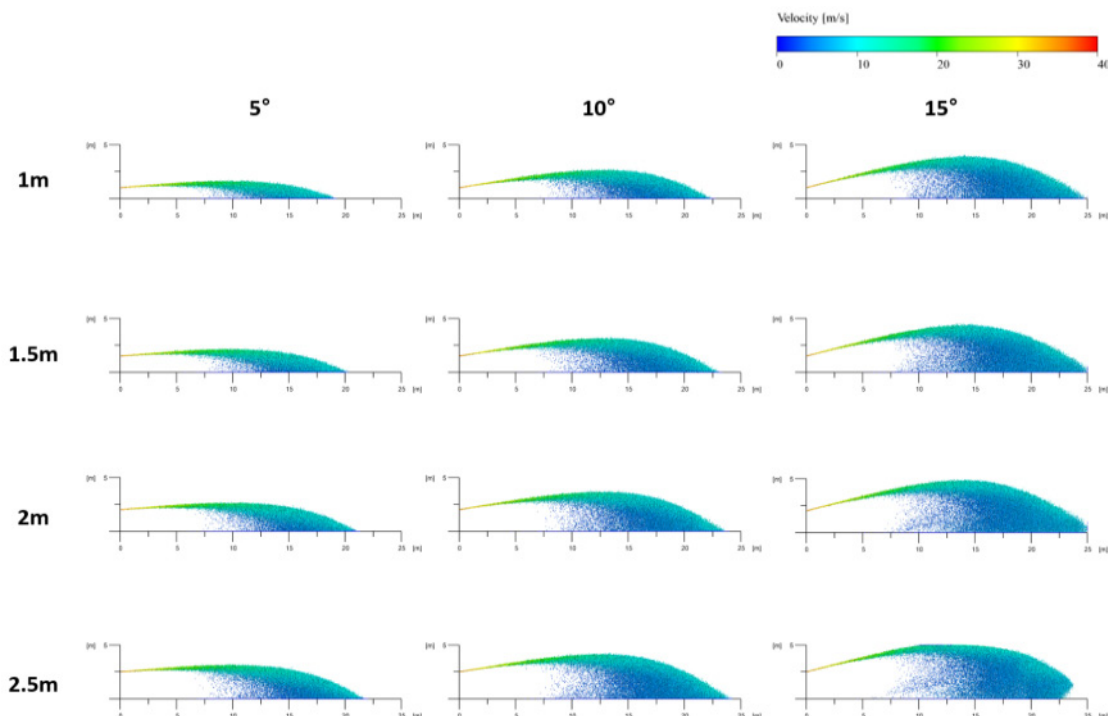


Figure 7. AFFF particle velocity and spray reach distance at final calculation time (2 seconds).

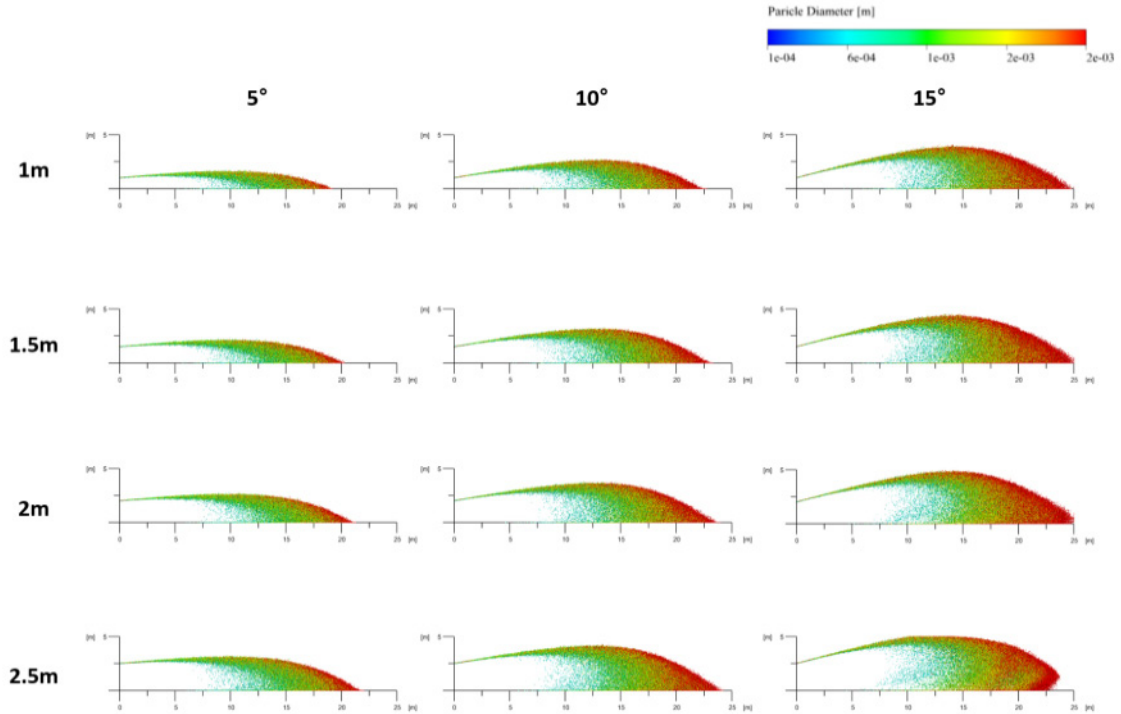
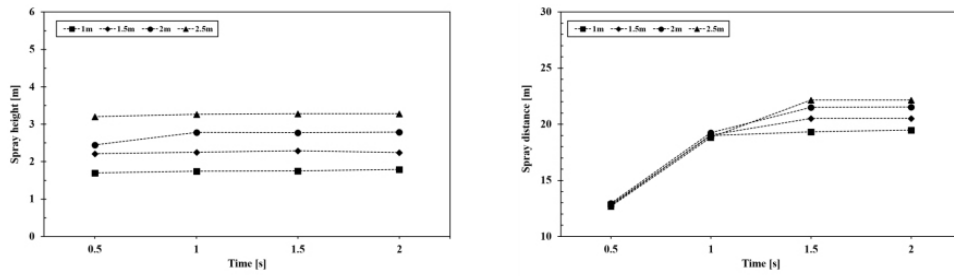
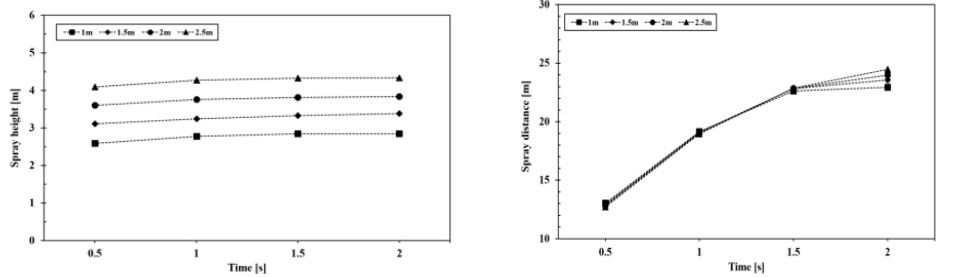


Figure 8. AFFF particle diameter and spray reach distance at final calculation time (2 seconds).

(a) Spray angle (5°)



(b) Spray angle (10°)



(c) Spray angle (15°)

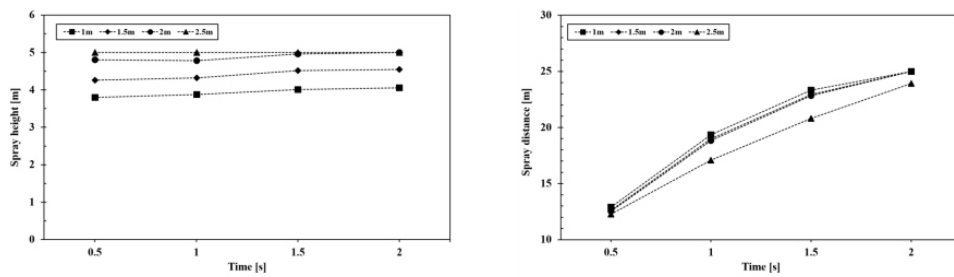


Figure 9. Maximum spray height (left) and spray reach (right) according to spray angle and spray monitor height.

Table 5. Maximum Spray Height and Spray Reach Distance According to Spray Monitor Height (Based on Spray Angle of 5°)

Spray angle [°]	Spray monitor height [m]	Analysis time [s]	Maximum spray height [m]	Spray reach [m]
5	1.0	0.5	1.70	12.85
		1.0	1.75	18.99
		1.5	1.76	19.33
		2.0	1.79	19.49
	1.5	0.5	2.21	12.78
		1.0	2.25	19.03
		1.5	2.30	20.53
		2.0	2.24	20.52
	2.0	0.5	2.45	12.97
		1.0	2.78	19.24
		1.5	2.78	21.52
		2.0	2.79	21.53
	2.5	0.5	3.21	12.70
		1.0	3.26	18.83
		1.5	3.28	22.17
		2.0	3.28	22.15

Table 6. Maximum Spray Height and Spray Reach Distance According to Spray Monitor Height (Based on Spray Angle of 10°)

Spray angle [°]	Spray monitor height [m]	Analysis time [s]	Maximum spray height [m]	Spray reach [m]
10	1.0	0.5	2.59	13.04
		1.0	2.77	19.15
		1.5	2.85	22.63
		2.0	2.85	22.93
	1.5	0.5	3.11	12.90
		1.0	3.24	19.09
		1.5	3.32	22.83
		2.0	3.38	23.55
	2.0	0.5	3.60	12.84
		1.0	3.76	19.04
		1.5	3.81	22.83
		2.0	3.84	23.99
	2.5	0.5	4.09	12.73
		1.0	4.27	18.95
		1.5	4.32	22.85
		2.0	4.33	24.48

동일한 직경으로 분사된 입자는 액적 충돌 및 분열 등에 의해 다양한 직경의 입자로 분열되며, 직경이 작은 입자는 도달거리가 비교적 짧아 지면으로 먼저 하강하게 되고, 입자의 직경이 클수록 도달거리가 증가하는 경향을 보여 입자의 거동은 관성에 의한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

Table 7. Maximum Spray Height and Spray Reach Distance According to Spray Monitor Height (Based on Spray Angle of 15°)

Spray angle [°]	Spray monitor height [m]	Analysis time [s]	Maximum spray height [m]	Spray reach [m]
15	1.0	0.5	3.80	12.89
		1.0	3.87	19.36
		1.5	4.01	23.33
		2.0	4.06	25.00
	1.5	0.5	4.26	12.61
		1.0	4.32	18.99
		1.5	4.51	22.94
		2.0	4.55	25.00
	2.0	0.5	4.80	12.53
		1.0	4.78	18.84
		1.5	4.96	22.82
		2.0	4.99	25.00
2.5	0.5	5.00	12.29	
	1.0	5.00	17.10	
	1.5	5.00	20.81	
	2.0	5.00	23.93	

앞에서 언급한 사항과 같이 현재 타당성 검증 해석을 통하여 신뢰성을 확보한 사항들을 함정 격실 해석에 동일하게 적용시켜 유의미한 결론을 얻고자 하였다. 하지만 함정 격실 적용 결과 역시 반드시 실험을 통한 타당성 검증이 필요하며 이 단계를 통하여 더 높은 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 실제 실험과 해석 결과와의 차이 비교를 통하여 다른 유의미한 데이터도 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 이러한 방향에 맞게 추후 연구를 지속할 예정이다.

4. 결 론

본 연구는 함정 유류화재 초기진압용 자율형 소화시스템 개발에 앞서 CFD 기법을 적용한 분사노즐 높이 및 분사각도에 따른 유동해석을 수행하여 수성막포의 분사 특성과 현장 적용 가능성을 확인하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 분사 실험데이터를 이용한 검증 해석 결과, 실험 결과와 0.7~12.2%의 오차율을 보였으나 실제 실험과 유사하게 분사압이 증가함에 따라 도달거리가 증가하는 경향을 보이므로 DPM 방법을 적용한 분사 도달 거리 예측은 타당하다고 판단된다.
2. 함정 구획 내 실내 분사 사전 해석 결과, 분사 높이 및 분사 각도가 증가함에 따라 분사 도달거리가 증가하는 경향을 보였다.
3. 분사 후 충돌 및 액적 분열 등으로 인해 동일한 직경으로 분사된 입자는 다양한 직경을 가지게 되며, 입자의 직경이 클수록 분사 도달거리가 길어지는 경향을 보여 분사된 수성막포 입자의 거동은 관성에 의한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.
4. 분사 높이가 2.5 m 기준 분사 각도가 15° 이상일 경우 최대 분사 높이가 실내 해석 높이 5 m를 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 소화 시스템 사전 설계에 유용한 데이터로 활용될 것으로 판단된다.

추후 실내 분사 실험 결과와의 비교를 통한 추가 검증이 필요하다 고 판단되며, 본 연구의 결과는 유사한 소화 시스템 구축 및 다양한 소화약제의 분사 특성 등에 대한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 충분한 실험 데이터를 축적하여 같이 활용한다면 현장 적용에 가능할 정도의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

기호설명

m_p : 입자의 무게
 u_p : 입자의 속도
 u_p : 유체의 속도
 τ_r : 입자에 작용하는 항력
 g : 중력 가속도
 ρ_p : 입자의 밀도
 ρ : 유체의 밀도
 F : 힘(Additional force)
 d_p : 입자의 지름
 μ : 유체의 점성
 C_d : 입자의 항력 계수
 Re : 레이놀즈 수
 y : 액적의 왜곡(Droplet distortion)
 r : 입자의 반지름
 r_c : 분열 후 액적의 반지름이며
 C_{RT} : 분열 상수
 g_t : 액적 가속도
 σ : 표면장력
 P_1 : 충돌 확률
 r_1, r_2 : 입자의 최대 및 최소 직경
 U_r : 입자 간 상대속도
 V : 연속상 격자의 체적
 \bar{n} : 충돌 예상 수
 n_2 : 최소 액적 parcel의 액적 수
 $\bar{\tau}$: 응력 텐서 ($= u[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I)]$)
 \vec{F} : 외부 물체력
 k : 난류 운동에너지
 ϵ : 소산율
 μ_t : 난류 점성
 σ_k : 난류 Prandtl 수
 G_t : 속도 구배로 생성된 난류 운동 에너지
 G_b : 부력에 의해 생성된 난류 운동 에너지
 Y_M : 전체 소산율에 대한 압축성 난류 팽창 기여도
 S_m, S_k : 소스항

감 사

본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (협약번호 UM23512RD5)

References

1. S. Y. Kwon, S. H. Lee, and D. H. Jeon, three-dimensional fluid flow analysis in taylor reactor using computational fluid dynamics, *Appl. Chem. Eng.*, **28**, 448-453 (2017).
2. Y. K. Lim, J. Y. Kim, Y. G. Na, and J. R. Kim, Quantitative analysis of fuel in engine oil, *Appl. Chem. Eng.*, **28**, 714-719 (2017).
3. E. Jin and Y. J. Chung, Assessment of fire risk rating for wood species in fire event, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 423-430 (2021).
4. H. G. Kim and Y. S. Lee, A Study on fire explosion characteristics via physico-chemical analysis of petroleum residues, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 556-561 (2019).
5. Y. J. Chung, E. Jin, and J. S. You, Evaluation of smoke risk and smoke risk rating for combustible substances from fire, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 197-204 (2021).
6. M. Abrofarakh and H. Moghadam, Investigation of thermal performance and entropy generation rate of evacuated tube collector solar air heater with inserted baffles and metal foam: A CFD approach, *Renew. Energy*, **223**, 120022 (2024).
7. D. S. Kim, J. H. Kwark, D. S. Kang, and B. S. Son, Development of fire extinguishing system suitable for unmanned engine room of a small ship, *Fire Sci. Eng.*, **20**, 96-100 (2006).
8. J. H. Seung, Y. C. Park, Y. H. Lee, and Y. C. Ryu, Numerical investigation of the effect of flow passage variation on the projection distance of the foam monitor, *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, **17**, 244-251 (2016).
9. Y. T. Han, D. H. Kim, and S. P. Kwon., An experimental study on the automobile engine room fire using the extinguishing agents, *Fire Sci. Eng.*, **28**, 1-7 (2014).
10. J. R. Kim, H. K. Ku, S. S. Oh, Development of fire extinguisher valves for tracked vehicle using Novec1230. *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, **12**, 1539-1546 (2011).
11. J. W. Lee, W. S. Lim, and D. H. Rie, A study on B Class fire extinguishing performance of air ratio in the compressed air foam system, *Fire Sci. Eng.*, **27**, 8-14 (2013).
12. K. S. Jeon, H. S. Kim, J. H. You, Y. H. You, and J. O. Park, Research on the rheological properties of aqueous film forming foam to respond to ship oil fires, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 603-607 (2023).
13. K. C. Ro, Effect of nozzle shape and injection pressure on performance of hybrid nozzle, *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, **18**, 74-79 (2017).
14. Y. W. Son, J. H. Lee, and S. M. Chang, CFD Analysis on the nozzle of high viscous row material for urethane foam, *KSCFE.*, **22**, 79-85 (2017).
15. Y. H. Jang and S. S. Kim., A study on the optimal operating conditions for an unreacted hydrogen oxidation-heat recovery system for the safety of the hydrogen utilization process, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 307-312 (2023).
16. J. W. Kim and M. K. Lee., A Comparison on detected concentrations of lpg leakage distribution through actual gas release, CFD (FLACS) and calculation of hazardous areas, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 102-109 (2021).
17. Y. S. Yun, J. S. Ju, and S. J. Lee, Comparison of design concepts for four different entrained-bed coal gasifier types with CFD analysis, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 566-574 (2011).
18. Y. H. Jang, H. D. Park, K. P. Lim, H. S. Park, J. H. Kim, and

- H. T. Cho, Analysis on the heat exchange efficiency of kraft recovery boiler by nose arch structure using CFD, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 149-156 (2021).
19. H. J. Kim and J. P. Park, Assessment of CFD estimation capability for the local loss coefficients of sudden contraction and expansion, *Appl. Chem. Eng.*, **21**, 258-264 (2010).
20. C. H. Joo, H. D. Park, H. T. Cho, H. W. Kim, and W. J. Cho, Optimization of plain jacked vessel design in adhesive production process using computational fluid dynamics, *Appl. Chem. Eng.*, **31**, 596-602 (2020).
21. S. H. Kim, M. K. Lee, J. W. Kim, and J. H. Lee, Diffusion range and pool formation in the leakage of liquid hydrogen storage tank using CFD tools, *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 653-660 (2022).
22. J. H. Yoon, Y. B. Kim, and H. W. Song, Effect of inlet shape on thermal flow characteristics for waste gas in a thermal decomposition reactor of scrubber system, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 510-518 (2018).
23. A. Jafarizadeh, M. Ahmadzadeh, M. Panjepour, and S. Mahmoudzadeh, Pressure gradient computation for foams with different geometric properties: Based on ann and svr machine learning model and trained by CFD simulations, *J. Porous Media*, **26**, 49-76 (2023).
24. B. J. Park, H. J. Sin, Y. H. Yoo, J. U. Park, and H. S. Kim, Evaluation test of applicability of compressed air foam fire extinguishing system for train fire at rescue station in Subsea tunnel, *J. Korean Tunn Undergr. Sp. Assoc.*, **18**, 413-418 (2016).
25. A. Jafarizadeh, M. A. Ahmadzadeh, M. Panjepour, and S. Mahmoudzadeh, A new approach for predicting the pressure drop in various types of metal foams using a combination of CFD and machine learning regression models, *Transp. Porous Media.*, **147**, 59-91 (2023).
26. J. U. Park, Y. H. Yoo, and H. S. Kim, Numerical study on the foam spraying for AFDSS applicable to initial fire suppression in large underground spaces, *J. Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc.*, **23**, 503-516 (2016).

Authors

- Kil-Song Jeon; Ph.D., Researcher, Department of Fire Researcher Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea; jeonkilsong@kict.re.kr
- Hwi-Seong Kim; B.Sc., Researcher, Department of Fire Researcher Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea; hwiseongkim@kict.re.kr
- Jae-Ung Sim; Ph.D., Researcher, Department of Fire Researcher Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea; simjaeung@kict.re.kr
- Yong-Ho Yoo; Ph.D., Senior Researcher, Department of Fire Researcher Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea; yhyoo@kict.re.kr
- Jin-Ouk Park; M.Sc., Researcher, Department of Fire Researcher Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea; jopark@kict.re.kr